



# Теплота

Если котелок с холодной водой поставить на зажженную горелку плиты, то температура воды возрастет. Мы говорим, что теплота от горячей горелки перешла к холодной воде. Когда два тела, имеющие разные температуры, приводятся в контакт, теплота переходит от более теплого к более холодному телу. Поток тепла направлен таким образом, чтобы температуры тел стали одинаковыми. Если два тела пребывают в контакте достаточно долго, так что их температуры становятся одинаковыми, то говорят, что тела находятся в тепловом равновесии; при этом никакого переноса тепла между ними не существует. Например, ртуть в медицинском термометре поднимается вверх, когда тепло от тела пациента передается термометру; если ртуть останавливается, то, следовательно, термометр пришел в тепловое равновесие с телом пациента; при этом температуры термометра и тела становятся одинаковыми.

## 19.1. Ранние теории теплоты; теплород

Обычно говорят о потоке теплоты – теплота «перетекает» от горелки плиты к кофейнику с кофе, от Солнца к Земле, от тела человека к медицинскому термометру. Теплота «перетекает» от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Действительно, еще в прошлом веке в теории теплоты считалось, что поток теплоты является результатом перемещения гипотетической субстанции, подобной жидкости и называемой *теплородом*. Согласно теории теплорода, любое тело содержит некоторое количество этой субстанции, и если в тело перетечет еще некоторое ее количество, то температура тела повысится; если же теплород вытечет из тела, то его температура понизится. Считалось, что когда тело разрушается (например, в процессе его сжигания), то освобождается значительное количество теплорода.

Однако в процессе переноса теплоты никогда не отмечалось изменения массы тела, и никаким другим методом теплород также не мог быть обнаружен. Поэтому предполагалось, что у теплорода нет ни массы, ни запаха, ни вкуса, ни цвета. Несмотря на несколько таинственный

характер этой субстанции, теория теплорода объясняла многие наблюдаемые явления, в частности тепловой «поток» от горячего тела к холодному. Но, как мы вскоре увидим, были обнаружены явления, не находившие удовлетворительного объяснения в рамках этой теории.

Хотя теория теплорода давно отброшена, ее отголоски остались, например выражение «тепловой поток», как если бы теплота была жидкостью. Одна из обычно используемых единиц измерений теплоты называется *калорией* («теплород» по латыни *calorie*). Эта единица определяется как *количество теплоты, необходимое для повышения температуры одного грамма воды на один градус Цельсия, а именно от температуры 14,5°C до температуры 15,5°C*. Эта конкретная температура указана потому, что количество теплоты, требуемое для нагрева, хотя и совсем незначительно, зависит от температуры. (В диапазоне температур от 0 до 100°C это изменение составляет не более 1%, и для большинства целей этим различием можно пренебречь.) Чаще используется более крупная единица – *килокалория* (ккал), которая равна 1000 кал. Таким образом, 1 ккал – это количество теплоты, необходимое для повышения температуры 1 кг воды на 1°C (от 14,5 до 15,5°C). Иногда килокалорию называют *большой калорией*, именно с помощью этих единиц указывается энергетическая цена, или калорийность пищи.

## 19.2. Теплота в процессе переноса энергии; механический эквивалент теплоты

Одной из главных трудностей теории теплорода была невозможность расчета полного количества теплоты<sup>1)</sup>, полученного трением. Если, например, долгое время тереть друг о друга ладони или два куска металла, то можно производить неограниченное количество теплоты. Американский ученый Бенжамин Томпсон (1753–1814), позже ставший графом Румфордом Баварским, вплотную столкнулся с этой трудностью, когда он наблюдал за процессом высверливания стволов пушек. В отверстие ствола пушки наливалась вода для его охлаждения в процессе сверления. При сверлении доливалась холодная вода, чтобы возместить потери выкипевшей воды. Было предположено, что теплород, вызывающий кипение воды, выделяется при разрушении металла. Но Румфорд заметил, что, даже если сверильные инструменты настолько затуплены, что разрушения металла не происходит, теплота все равно производится и вода выкипает. Следовательно, теплород высвобождается, даже если не проис-

<sup>1)</sup> Слово «теплота» здесь используется в разговорном смысле. Позже в этом разделе понятие теплоты будет определено более точно – на современном уровне (см. также разд. 19.3).

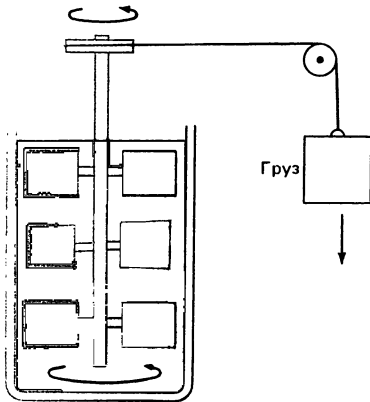


Рис. 19.1. Опыт Джоуля по определению механического эквивалента теплоты.

ходит разрушения вещества. Более того, процесс высвобождения теплорода может происходить неограниченно, что приводит к возникновению неограниченного количества теплоты. Это противоречит предположению о том, что теплота является субстанцией, и, следовательно, внутри тела может содержаться только ограниченное ее количество. Поэтому Румфорд отбросил теорию теплорода и вместо этого предположил, что теплота является особым видом движения. Он утверждал, что при некоторых обстоятельствах теплота производится за счет совершения механической работы (например, при трении двух тел друг о друга). Эта идея была в начале 1800-х годов развита другими исследователями, в частности английским пивоваром Джеймсом Джоулем (1818–1889).

Джоуль поставил ряд экспериментов, которые оказались основополагающими для современного представления о том, что теплота, как и работа,—это способ передачи энергии. На рис. 19.1 показана упрощенная схема одного из опытов Джоуля. Подвешенное тело заставляет вращаться турбину с лопатками. Трение лопаток о воду приводит к небольшому повышению температуры воды (именно это повышение температуры было непосредственно измерено Джоулем). Разумеется, такое же повышение температуры можно было бы получить, нагревая воду на горелке плиты. В этом и многих других опытах (в некоторые из них входила электрическая энергия) Джоуль обнаружил, что определенная работа всегда эквивалентна определенному количеству теплоты. Было показано, что численно работа, равная 4,186 джоуля (Дж), эквивалентна 1 калории (кал) теплоты. Это соответствие известно как *механический эквивалент теплоты*:

$$4,186 \text{ Дж} = 1 \text{ кал},$$

$$4,186 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 1 \text{ ккал}.$$

С помощью этих и других опытов ученые пришли к отказу о представлении теплоты как некоей субстанции или даже формы энергии, но установили, что теплота—это способ передачи энергии. При переходе теплоты от более горячего тела к более холодному именно энергия переходит от горячего тела к холодному. Следовательно, *теплота—это энергия, которая переходит от одного тела к другому из-за разницы в их температурах*. В системе СИ единицей измерения теплоты, как и любой формы энергии, является джоуль. Тем не менее иногда по-прежнему используют внесистемные единицы измерения теплоты—калорию и килокалорию. В настоящее время калория *определяется* через джоуль (а не с помощью свойств воды, как было сделано в разд. 19.1). Определение, данное выше (1 кал = 4,186 Дж), согласуется с более ранним определением. Но в настоящее время используется другое определение:

$$1 \text{ кал} = 4,184 \text{ Дж}.$$

Эта калория называется *термохимической калорией*. Мы не будем останавливаться здесь на небольшом различии этих двух определений, разница между которыми составляет не более 0,05%.

Развитие молекулярно-кинетической теории полностью подтвердило и дало хорошее объяснение гипотезе о том, что теплота есть способ передачи энергии. Рассмотрим процесс нагревания котелка с водой на плите. Согласно молекулярно-кинетической теории, средняя кинетическая энергия молекул возрастает с ростом температуры; следовательно, кинетическая энергия молекул пламени горелки в среднем во много раз превышает среднюю кинетическую энергию молекул холодной воды в котелке. При столкновениях молекул пламени, обладающих большой кинетической энергией, с молекулами котелка часть их кинетической энергии переходит к молекулам котелка точно так же, как быстро движущийся бильярдный шар передает часть своей кинетической энергии шару, с которым он соударяется. Молекулы котелка приобретают кинетическую энергию (молекулы пламени теряют энергию). В свою очередь, молекулы котелка, обладающие теперь большой кинетической энергией, передадут при столкновениях часть своей кинетической энергии молекулам воды, имеющим меньшую кинетическую энергию. Именно благодаря этим процессам и возрастает температура воды и котелка. Следовательно, мы показали, почему передача теплоты является, по существу, передачей энергии.

### 19.3. Различие между температурой, теплотой и внутренней энергией

Введем теперь в рассмотрение понятие внутренней энергии, поскольку это поможет прояснить представление о теплоте. **Тепловой, или внутренней, энергией** (мы будем использовать оба этих названия равноправно) называется полная сумма всех видов энергии всех молекул, принадлежащих телу. Иногда внутреннюю энергию называют «теплосодержанием» тела, но такое название неудачно, и его можно перепутать с собственно теплотой. Теплота, как мы уже выяснили, — это не заключенная в теле энергия, а то количество энергии, которое передается от горячего тела холодному.

Различие между температурой, теплотой и внутренней энергией можно понять с помощью молекулярно-кинетической теории. Температура является мерой *средней* кинетической энергии отдельных молекул тела. Тепловая, или внутренняя, энергия тела относится к *полной* энергии всех молекул тела. (Таким образом, у двух горячих железных брусков одинаковой массы могут быть одинаковые температуры, но тепловая энергия двух брусков

будет в два раза больше тепловой энергии одного из них.) Теплота же характеризует передачу энергии (обычно тепловой энергии) от одного тела к другому из-за различия их температур.

Заметим, что направление потока теплоты между двумя телами зависит от их температур, но не зависит от того, как много внутренней энергии заключено в каждом из них. Таким образом, если 50 г воды при температуре 30 °С привести в контакт (или смешать) с 200 г воды, имеющей температуру 25 °С, то теплота будет переходить *от* воды с температурой 30 °С *к* воде с температурой 25 °С, даже если внутренняя энергия воды при температуре 25 °С значительно больше, так как этой воды просто больше по количеству.

#### 19.4. Внутренняя энергия идеального газа

Вычислим внутреннюю энергию  $n$  молей идеального одноатомного (на молекулу приходится один атом) газа. Внутренняя энергия  $U$  является суммой кинетических энергий поступательного движения всех атомов. Эта сумма в точности равна средней кинетической энергии одной молекулы, умноженной на полное число молекул  $N$ :

$$U = N \left( \frac{1}{2} m \overline{v^2} \right).$$

Из соотношения (18.4) мы имеем

$$U = \frac{3}{2} N k T,$$

или

$$U = \frac{3}{2} n R T \quad [\text{одноатомный идеальный газ}],$$

где  $n$  — число молей газа. Таким образом, внутренняя энергия идеального газа определяется только температурой и числом молей газа.

Если молекулы газа содержат больше одного атома, то необходимо учитывать энергии вращательного и колебательного движений молекул. У многоатомного газа при данной температуре внутренняя энергия больше, чем у одноатомного, но по-прежнему эта энергия является функцией только температуры.

Внутренняя энергия реальных газов также зависит от температуры, однако в той области, где их поведение существенно отличается от идеального, она зависит в некоторой степени от давления и объема.

Внутренняя энергия жидкостей и твердых тел имеет очень сложный вид, поскольку в нее входит потенциальная энергия электрического взаимодействия, связанная с силами (или «химическими» связями), действующими между атомами и молекулами.

## 19.5. Теплоемкость

Из опыта получено, что количество теплоты  $Q$ , необходимое для изменения температуры системы, пропорционально массе системы  $m$  и изменению температуры  $\Delta T$ . Это было известно уже в восемнадцатом столетии. Соотношение между  $Q$ ,  $m$  и  $\Delta T$  можно записать, таким образом, в виде

$$Q = mc \Delta T, \quad (19.1)$$

где  $c$  — величина, характеризующая данное вещество и называемая *удельной теплоемкостью*. Для воды при температуре  $15^\circ\text{C}$  и постоянном давлении 1 атм мы имеем  $c = 1,00$  ккал/кг $\cdot$ °C или  $4,18 \cdot 10^3$  Дж/кг $\cdot$ °C; это соответствует тому, что для повышения температуры 1 кг воды на  $1^\circ\text{C}$  требуется 1 ккал теплоты. В табл. 19.1 приведены удельные теплоемкости некоторых веществ при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Теплоемкость  $c$  зависит в какой-то мере от температуры (также слабо зависит она и от давления), но в очень небольшом температурном диапазоне ее можно во многих случаях рассматривать как постоянную<sup>1)</sup>.

Теплоемкость, определяемая выражением (19.1), зависит также от того, каким образом происходит процесс нагревания. Предположим, что нагревание проводится при постоянном (атмосферном) давлении; при таком нагревании теплоемкость  $c$  называют теплоемкостью при постоянном давлении и обозначают  $c_p$ . Именно эта величина приведена в табл. 19.1, поскольку ее наиболее просто измерить как для твердых тел, так и для жидкостей. Существует много других условий, при которых можно сообщать телу теплоту. Например, может оставаться постоянным объем вещества (при этом давление может изменяться); в этом случае мы имеем теплоемкость при постоянном объеме, которая обозначается  $c_v$ . Различие между  $c_p$  и  $c_v$  для твердых тел и жидкостей составляет обычно несколько процентов; для газов эта разница гораздо больше, и этот вопрос мы обсудим в разд. 20.4. Далее нас будет интересовать только теплоемкость  $c_p$  (если не будет оговорено иное), и поэтому индекс  $p$  мы опустим.

Таблица 19.1. Удельные теплоемкости\* при постоянном давлении (температура  $20^\circ\text{C}$  и давление 1 атм)

Вещество	Удельная теплоемкость $c_p$ ,	
	ккал/кг $\cdot$ °C	Дж/кг $\cdot$ °C
Алюминий	0,22	900
Медь	0,093	390
Стекло	0,20	840
Лед ( $-5^\circ\text{C}$ )	0,50	2100
Железо или сталь	0,11	450
Свинец	0,031	130
Мрамор	0,21	860
Серебро	0,056	230
Древесина	0,4	1700
Этиловый спирт	0,58	2400
Ртуть	0,033	140
Вода ( $15^\circ\text{C}$ )	1,00	4186
Пар ( $110^\circ\text{C}$ )	0,48	2010
Тело человека	0,83	3470
Белок	0,4	1700

\* Аналогичную таблицу для газов см. в гл. 20 (табл. 20.1).

<sup>1)</sup> Для учета зависимости теплоемкости  $c$  от температуры  $T$  можно переписать соотношение (19.1) в другом виде:  $dQ = mc dT$ ; следовательно, количество теплоты  $Q$ , необходимое для изменения температуры от  $T_1$  до  $T_2$ , запишется в виде

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc dT,$$

где  $c$  является функцией температуры.

**Пример 19.1.** Какое количество теплоты необходимо для нагрева 20 кг железа от 10 до 90 °С?

**Решение.** Из табл. 19.1 следует, что теплоемкость железа равна 0,11 ккал/(кг·°С). Изменение температуры равно

90 °С – 10 °С = 80 °С. Таким образом,

$$\begin{aligned} Q &= mc \Delta T = \\ &= (20 \text{ кг}) (0,11 \text{ ккал/кг} \cdot \text{°С}) (80 \text{ °С}) = \\ &= 180 \text{ ккал.} \end{aligned}$$

Если бы железо охлаждалось от 90 до 10 °С, то при этом выделилось бы 180 ккал теплоты. Иными словами, формула (19.1) справедлива для теплового потока как при подведении, так и при отводе теплоты с соответствующим повышением или понижением температуры. Если бы в предыдущем примере пришлось нагревать от 10 до 90 °С не железо, а 20 кг воды, то для этого потребовалось бы 1600 ккал теплоты. Из всех веществ вода имеет наибольшую теплоемкость, что делает ее идеальной средой для отопительных систем (батарей) на горячей воде и других целей, когда перепад температур должен быть минимальным.

В случае когда разные части изолированной системы имеют различные температуры, теплота будет переходить от той части, у которой более высокая температура, к той, у которой она более низкая. Если система полностью изолирована, то никакая энергия не может быть подведена к системе или отведена от нее: следовательно, согласно закону сохранения энергии, количество теплоты, теряемое одной частью системы, равно количеству теплоты, получаемому другой частью:

Теряемое количество теплоты = Получаемое количество теплоты.

Рассмотрим теперь следующий пример.

**Пример 19.2.** В стеклянную чашку массой 300 г с температурой 25 °С наливают 200 см<sup>3</sup> чая, имеющего температуру 95 °С. Какая температура будет у чашки с чаем, после того как установится тепловое равновесие? Предположим, что теплообмена с окружающей средой не происходит.

**Решение.** Поскольку чай состоит в основном из воды, его теплоемкость равна 1,00 ккал/кг·°С, а его масса  $m$  равна произведению плотности чая на занимаемый им объем, т. е.  $m = \rho V = (1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3) \times (200 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3) = 0,20 \text{ кг}$ . Мы установи-

ли, что

$$\left( \begin{array}{l} \text{Количество теплоты,} \\ \text{отданное чаем} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Количество теплоты,} \\ \text{полученной чашкой} \end{array} \right),$$

$$m_{\text{чай}} c_{\text{чай}} (95^\circ\text{С} - T) = m_{\text{чаш}} c_{\text{чаш}} (T - 25^\circ\text{С}).$$

Здесь  $T$  – конечная температура, подлежащая определению. Подставим в последнее равенство численные значения, используя данные табл. 19.1:

$$\begin{aligned} (0,20 \text{ кг}) (1,00 \text{ ккал/кг} \cdot \text{°С}) (95^\circ\text{С} - T) &= \\ = (0,30 \text{ кг}) (0,20 \text{ ккал/кг} \cdot \text{°С}) (T - 25^\circ\text{С}), & \\ 19 - 0,20T &= 0,060T - 1,5; \end{aligned}$$

окончательно находим  $T = 79^\circ\text{С}$ .

Рассмотренный в примере 19.2 обмен энергией лежит в основе метода, называемого *калориметрией*, который заключается в количественном измерении обмена теплотой. Для проведения таких измерений используется *калори-*

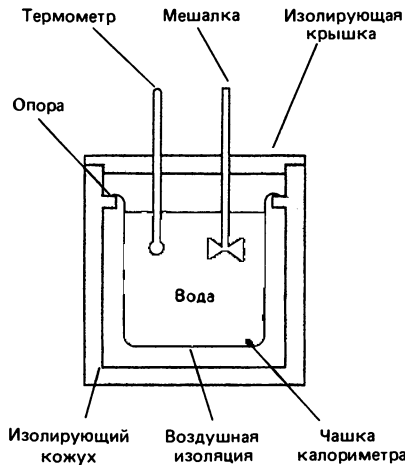


Рис. 19.2. Простой водяной калориметр.

*метр.* На рис. 19.2 изображен простой водяной калориметр. Очень важно, чтобы калориметр был хорошо теплоизолирован, так чтобы с окружающей средой происходил лишь минимальный теплообмен. Одним из важных применений калориметра является определение теплоемкости веществ. В методе, называемом методом смешивания, образец данного вещества нагревается до высокой температуры, которая измеряется с высокой степенью точности. Затем образец быстро помещается в холодную воду калориметра. Теплота, теряемая образцом, будет передаваться воде и калориметру. Измеряя конечную температуру «смеси» в калориметре, можно вычислить теплоемкость вещества, как показано в следующем примере.

**Пример 19.3.** Необходимо определить теплоемкость нового сплава. Для этого образец сплава массой 0,150 кг нагревается до температуры 540 °С и быстро помещается в 400 г воды с температурой 10,0 °С, которая находится в алюминиевой чашке калориметра массой 200 г. (Нам не нужно знать массу изолирующего кожуха, поскольку мы предполагаем, что его температура существенно не меняется.) Конечная температура, установившаяся в калориметре, равна 30,5 °С. Вычислим теплоемкость сплава.

**Решение.** Воспользуемся тем, что количество теряемой теплоты равно количеству получаемой теплоты. Таким об-

разом,

$$\left( \begin{array}{c} \text{Количество} \\ \text{теплоты,} \\ \text{теряемое} \\ \text{образцом} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Количество} \\ \text{теплоты,} \\ \text{получаемое} \\ \text{водой} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Количество} \\ \text{теплоты,} \\ \text{получаемое} \\ \text{калориметром} \end{array} \right)$$

$$m_{\text{обр}} c_{\text{обр}} \Delta T_{\text{обр}} = m_{\text{вода}} c_{\text{вода}} \Delta T_{\text{вода}} + m_{\text{кал}} c_{\text{кал}} \Delta T_{\text{кал}}.$$

Подставим в это уравнение численные значения, используя табл. 19.1:

$$\begin{aligned} (0,150 \text{ кг}) (c_{\text{обр}}) (540 \text{ }^\circ\text{C} - 30,5 \text{ }^\circ\text{C}) &= \\ &= (0,40 \text{ кг}) (1,0 \text{ ккал/кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}) (30,5 \text{ }^\circ\text{C} - \\ &- 10,0 \text{ }^\circ\text{C}) + (0,20 \text{ кг}) (0,22 \text{ ккал/кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}) \times \\ &\times (30,5 \text{ }^\circ\text{C} - 10,0 \text{ }^\circ\text{C}), \\ 76,5 c_{\text{обр}} &= (8,2 + 0,9) \text{ ккал/кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}, \\ c_{\text{обр}} &= 0,12 \text{ ккал/кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$



Выполняя этот расчет, мы не учитывали потерь, связанных с передачей теплоты термометру и мешалке (последняя необходима для ускорения процессов теплопередачи и, следовательно, для уменьшения потерь, связанных с отдачей тепла во внешнюю среду). Эти потери могут быть учтены добавлением дополнительных членов в правую часть написанного выше

уравнения. Это внесет небольшую поправку в теплоемкость  $c_{\text{обр}}$  (см. задачи в конце настоящей главы). Следует заметить, что величина  $m_{\text{кал}}c_{\text{кал}}$  часто называется *водяным эквивалентом* калориметра, поскольку произведение  $m_{\text{кал}}c_{\text{кал}}$  численно равно массе воды (в килограммах), которая поглотила бы то же количество теплоты.

## 19.6. Теплота фазового перехода

Если вещество испытывает фазовый переход из твердого состояния в жидкое или из жидкого в газообразное (см. также разд. 18.5), то этот процесс *изменения фазы* сопровождается передачей некоторого количества энергии. Проследим, например, что происходит при равномерном нагреве воды массой 1,0 кг от температуры, скажем,  $-20^\circ\text{C}$ , когда вода является льдом, до тех пор, пока весь лед не превратится в воду, которая затем при дальнейшем нагревании при температуре  $100^\circ\text{C}$  превратится в пар. Будем считать, что все процессы происходят при давлении 1 атм. Как показано на рис. 19.3, каждый раз при сообщении льду килокалории теплоты его температура возрастает на  $2^\circ\text{C}$  (поскольку теплоемкость льда  $c \approx 0,50$  ккал/кг $\cdot^\circ\text{C}$ ). Однако, когда температура достигает  $0^\circ\text{C}$ , ее рост прекращается, хотя теплота по-прежнему подводится. Вместо повышения температуры, поскольку льду сообщается теплота, он постепенно превращается в воду, т.е. переходит в жидкую фазу без изменения температуры. После того как льду при  $0^\circ\text{C}$  будет сообщено около 40 ккал теплоты, половина его останется в твердом состоянии, а половина превратится в воду. После того как льду будет сообщено 80 ккал теплоты, весь лед превратится в воду, но температура воды по-прежнему будет равна  $0^\circ\text{C}$ . Дальнейшее добавление теплоты приведет к повышению температуры (но теперь со скоростью  $1^\circ\text{C}/\text{ккал}$ ). Когда вода нагреется до  $100^\circ\text{C}$ , температура опять остановится на постоянном уровне, так как сообщаемая теплота будет идти на превращение



Рис. 19.3. Подводимая к системе теплота для превращения в пар 1,0 кг льда, находящегося при температуре  $-20^\circ\text{C}$ .

Таблица 19.2. Теплота фазовых переходов для различных веществ (при давлении 1 атм)

Вещество	Точка плавления, °С	Теплота плавления		Точка кипения, °С	Теплота парообразования	
		ккал/кг*	10 <sup>5</sup> Дж/кг		ккал/кг*	10 <sup>5</sup> Дж/кг
Кислород	-218,8	3,3	0,14	-183	51	2,1
Этиловый спирт	-114	25	1,04	78	204	8,5
Вода	0	79,7	3,33	100	539	22,6
Свинец	327	5,9	0,25	1750	208	8,7
Серебро	961	21	0,88	2193	558	23
Вольфрам	3410	44	1,84	5900	1150	48

\* Значения величин в единицах ккал/кг совпадают численно с их значениями в единицах кал/г.

воды в пар. Для превращения 1,0 кг воды полностью в пар потребуется около 540 ккал. После того как такое количество теплоты будет сообщено воде, кривая на рис. 19.3 снова пойдет вверх, указывая на то, что теперь при добавлении теплоты температура пара повышается.

Количество теплоты, которое требуется для превращения 1 кг вещества из твердого состояния в жидкое, называется *теплотой плавления*; мы будем обозначать ее  $l_{пл}$ . Теплота плавления льда равна 79,7 ккал/кг. Количество теплоты, необходимое для превращения 1,0 кг вещества из жидкого состояния в пар, называется *теплотой испарения (парообразования)*; мы будем обозначать ее  $l_{исп}$ . Для воды теплота испарения равна 539 ккал/кг. У остальных веществ температура изменяется аналогично кривой, изображенной на рис. 19.3, хотя температуры точек плавления и кипения будут иными так же, как теплоемкости, теплота плавления и теплота испарения. В табл. 19.2 представлены для некоторых веществ значения теплоты плавления и теплоты испарения, которые называются также *скрытой теплотой*, или *теплотой фазового перехода*.

Теплота испарения и теплота плавления также связаны с количествами теплоты, выделяющимися при переходе вещества из газообразного состояния в жидкое и из жидкого состояния в твердое. Так, пар выделяет 539 ккал/кг, когда превращается в воду, вода выделяет 79,7 ккал/кг, когда превращается в лед.

Теплота, выделяющаяся или поглощающаяся при изменении фазы, определяется, разумеется, не только теплотой фазового перехода, но и полной массой вещества. Иначе говоря, можно написать следующее равенство:

$$Q = ml,$$

где  $l$  – теплота фазового перехода в конкретном процессе,  $m$  – масса вещества, а  $Q$  – количество теплоты, поглощающейся или выделяющейся при этом. Например, когда при температуре 0 °С замерзает 5,00 кг воды, выделяется (5,00 кг) (79,7 ккал/кг) = 398 ккал энергии.

Как мы увидим из следующих примеров, калориметрия иногда имеет дело со случаями, когда происходит изменение фазового состояния. Действительно, с помощью калориметрии нередко измеряют скрытую теплоту.

**Пример 19.4.** Какое количество энергии должен отобрать холодильник у 1,5 кг воды, имеющей температуру 20 °С, чтобы заморозить ее и превратить в лед с температурой –12 °С?

**Решение.** При охлаждении воды от температуры 20 °С до 0 °С, превращении воды в лед и последующем охлаждении льда от 0 до –12 °С выделяется теплота.

$$Q = mc_{\text{вода}}(20^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) + ml_{\text{пл}} + mc_{\text{лед}}[0^\circ\text{C} - (-12^\circ\text{C})] =$$

$$= (1,5 \text{ кг})(1,0 \text{ ккал/кг} \cdot \text{C})(20^\circ\text{C}) +$$

$$+ (1,5 \text{ кг})(80 \text{ ккал/кг}) +$$

$$+ (1,5 \text{ кг})(0,5 \text{ ккал/кг} \cdot \text{C})(12^\circ\text{C}) =$$

$$= 160 \text{ ккал},$$

или  $6,7 \cdot 10^5$  Дж.

**Пример 19.5.** Кусок льда массой 0,50 кг с температурой –10 °С помещен в воду массой 3,0 кг, имеющей температуру 20 °С. Чему будет равна температура смеси и в каком фазовом состоянии она будет находиться после установления теплового равновесия?

**Решение.** При решении этого примера, прежде чем выписывать уравнение теплового баланса, нужно разобраться, в каком фазовом состоянии окажется смесь после установления равновесия: будет ли это только лед, смесь льда и воды при 0 °С или только вода. При охлаждении 3,0 кг воды от 20 до 0 °С выделится энергия  $mc\Delta T = (3,0 \text{ кг})(1,0 \text{ ккал/кг} \cdot \text{C})(20^\circ\text{C}) =$

$= 60$  ккал. Для нагрева льда от –10 до 0 °С потребуется  $(0,50 \text{ кг})(0,50 \text{ ккал/кг} \cdot \text{C}) \times (10^\circ\text{C}) = 2,5$  ккал, а для превращения льда в воду при 0 °С необходимо  $(0,50 \text{ кг}) \times (80 \text{ ккал/кг}) = 40$  ккал, что в сумме составит 42,5 ккал. Это меньше, чем энергия, выделяющаяся при охлаждении 3 кг воды от 20 до 0 °С, так что смесь будет водой с температурой где-то между 20 и 0 °С. Конечную температуру можно определить, записав следующее уравнение:

Количество теплоты, поглощаемое льдом при нагревании от –10 до 0 °С	+	Количество теплоты, поглощаемое при превращении льда в воду	+	Количество теплоты, поглощаемое при нагреве 0,50 кг воды от 0 °С до $T$	=
--	---	---	---	--	---

Количество  
теплоты,  
выделяемое  
 $= 3,0$  кг воды  
при  
охлаждении  
от 20 °С до  $T$

Следовательно,  
 $2,5 \text{ ккал} + 40 \text{ ккал} +$   
 $+ (0,50 \text{ кг})(1,0 \text{ ккал/кг} \cdot \text{C})(T) =$   
 $= (3,0 \text{ кг})(1,0 \text{ ккал/кг} \cdot \text{C})(20^\circ\text{C} - T),$

или  
 $42,5 + 0,50T = 60 - 3,0T,$   
 $T = 5,0^\circ\text{C}.$

Теплота, необходимая для перехода вещества из жидкого состояния в газообразное, должна сообщаться веществу не только в точке кипения. Например, вода может переходить из жидкой в газовую фазу даже при комнатной температуре. Такой процесс называется *испарением* (мы уже рассматривали его в разд. 18.3). Значение теплоты парообразования слегка возрастает с понижением температуры: так, при 20 °С она составляет 585 ккал/кг, тогда как при 100 °С мы имеем 539 ккал/кг.

Для того чтобы понять, почему для плавления или

испарения вещества необходимо затратить энергию, можно использовать молекулярно-кинетическую теорию. В точке плавления поступающая извне теплота плавления не увеличивает кинетической энергии (и соответственно температуры) молекул или атомов твердого тела, а идет на преодоление потенциального барьера, обусловленного межмолекулярными силами. Это означает, что, для того чтобы высвободить молекулы из их относительно жестко фиксированных положений в твердом состоянии, нужно совершить работу против действующих между молекулами сил притяжения. Лишь после этого молекулы смогут свободно перемещаться относительно друг друга, как это свойственно жидкому состоянию. Аналогично энергия требуется и для высвобождения молекул жидкости, удерживаемых силами притяжения вблизи друг друга, чтобы жидкость могла перейти в газовую фазу. Этот процесс сопровождается значительно более глубокой перестройкой в расположении молекул, чем при плавлении (сильно увеличивается среднее расстояние между молекулами), и потому теплота испарения для данного вещества, как правило, значительно больше теплоты плавления.

## 19.7. Передача теплоты; теплопроводность

Теплота может передаваться из одного места тела в другое тремя различными способами: с помощью *теплопроводности*, *конвекции* и *излучения*. Мы обсудим последовательно каждый из этих способов; заметим, однако, что в практических ситуациях могут одновременно осуществляться любые два из них (или даже все три) одновременно. Рассмотрим сначала процесс теплопроводности.

Когда отливка из металла помещается в открытое пламя или серебряная ложка погружается в тарелку с горячим супом, свободные концы этих предметов вскоре также оказываются горячими, хотя они и не находились в прямом контакте с источником тепла. В этих случаях мы говорим, что тепло передается (или переносится) от нагретого конца предмета к его холодному концу.

Явление *теплопроводности* можно представлять себе как результат столкновений молекул. По мере нагревания одного из концов предмета молекулы в нем начинают двигаться все быстрее и быстрее. При столкновениях с менее быстро движущимися соседними молекулами они передают им часть своей энергии, в результате чего скорость последних увеличивается. Затем ускорившиеся молекулы передают часть своей энергии в процессе столкновений следующим молекулам, находящимся еще дальше от нагретого конца. Таким образом, можно сказать, что происходит передача (или перенос) теплоты, т.е.

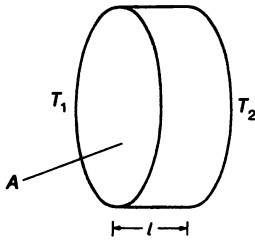


Рис. 19.4. Теплопроводность.

передача энергии теплового движения по объему тела за счет столкновений между молекулами.

Явление теплопроводности происходит только при наличии разности температур между различными точками тела. Экспериментально установлено, что количество теплоты, которое переносится в единицу времени из одного конца тела в другое (это называется тепловым потоком), пропорционально разности температур на его концах. Тепловой поток зависит также от размеров и формы тела. Мы рассмотрим этот вопрос количественно на примере теплового потока через однородное симметричное тело (рис. 19.4). Экспериментально установлено, что тепловой поток, определяемый количеством теплоты  $\Delta Q$ , проходящим через поперечное сечение тела площадью  $A$  за промежуток времени  $\Delta t$ , дается выражением

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{T_2 - T_1}{l}, \quad (19.2a)$$

где  $l$  – расстояние между двумя концами стержня, находящимися при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно, а  $k$  – коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом теплопроводности* и характеризующий свойства самого вещества. В некоторых случаях (например, когда величины  $k$  или  $A$  нельзя считать постоянными) приходится рассматривать предельный случай бесконечно тонкой пластинки толщиной  $dx$ . При этом выражение (19.2a) принимает вид

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (19.26)$$

где  $dT/dx$  – градиент температуры, а знак минус указывает на то, что тепловой поток направлен в сторону, противоположную градиенту температуры<sup>1)</sup>.

В табл. 19.3 приведены коэффициенты теплопроводности  $k$  для различных веществ. Вещества с большими значениями  $k$  легко проводят тепло и называются *хорошими проводниками* тепла. К ним относится большинство металлов, хотя у них величина  $k$  может иметь самые различные значения, в чем нетрудно убедиться, подержав в тарелке с горячим супом ложку из серебра и из нержавеющей стали. Вещества, у которых коэффициент тепло-

Таблица 19.3. Коэффициенты теплопроводности различных веществ

Вещество	Теплопроводность $k$	
	$10^{-4}$ ккал/(с· м·°С)	Дж/(с· м·°С)
Серебро	1000	420
Медь	920	380
Алюминий	500	200
Сталь	110	40
Стекло (обычное)	2,0	0,84
Бетон и кирпич	2,0	0,84
Вода	1,4	0,56
Ткань тела человека (сухая)	0,5	0,2
Асбест	0,4	0,16
Древесина	0,2–0,4	0,08– 0,16
Пробка и стекло- волокно	0,1	0,042
Пух	0,06	0,025
Воздух	0,055	0,023

<sup>1)</sup> Соотношение (19.2a), согласно которому тепловой поток (в единицу времени) пропорционален площади поперечного сечения и градиенту температуры, полностью аналогично соотношениям, описывающим диффузию (гл. 18) и течение жидкости в трубе (гл. 13). В этих случаях поток вещества через единицу площади поперечного сечения пропорционален соответственно градиенту концентрации или давления. Именно благодаря этой аналогии мы используем термин «поток» применительно к количеству теплоты; однако следует иметь в виду, что в последнем случае происходит перенос только энергии, но не вещества.

проводности мал (например, асбест или пух), плохо проводят тепло и называются поэтому *теплоизоляторами*. То, что коэффициент теплопроводности  $k$  у разных веществ различен, позволяет объяснить и такие простые явления, как, например, почему, когда мы стоим босиком на кафельном полу, мы ощущаем его значительно более холодным, чем покрытый ковром пол при той же температуре. Дело в том, что кафель является лучшим проводником тепла, чем ковер; поэтому теплота, приходящая от ног к коврику, сразу не уходит к другим телам, и поверхность ковра быстро нагревается до температуры ног. В отличие от этого кафель хороший проводник тепла, он быстро проводит тепло и потому может забрать у ног большее количество тепла, так что температура поверхности кафельного пола понижается.

**Пример 19.6.** Основным источником тепловых потерь в доме являются окна. Вычислите тепловой поток в единицу времени через стеклянное окно площадью  $A = 2,0 \text{ м} \times 1,5 \text{ м}$  толщиной  $3,2 \text{ мм}$ , если температуры внутренней и внешней поверхностей окна равны соответственно  $15$  и  $14^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Подставляя в соотношение (19.2а) значения  $A = (2,0 \text{ м})(1,5 \text{ м}) = 3 \text{ м}^2$  и  $l = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , а также значение  $k$  для стекла из табл. 19.3, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{\Delta t} &= \\ &= \frac{(0,84 \text{ Дж/с} \cdot \text{м} \cdot ^\circ\text{C})(3,0 \text{ м}^2)(15,0^\circ\text{C} - 14,0^\circ\text{C})}{3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = \\ &= 790 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Это эквивалентно потоку теплоты  $(790 \text{ Дж/с}) / (4,18 \cdot 10^3 \text{ Дж/ккал}) = 0,19 \text{ ккал/с}$ , или  $(0,19 \text{ ккал/с})(3600 \text{ с/ч}) = 684 \text{ ккал/ч}$ .

Можно, разумеется, возразить, что  $15^\circ\text{C}$  — это не слишком высокая температура для жилого помещения. Однако температура в комнате может быть значительно выше  $15^\circ\text{C}$  (а внешняя температура за окном может быть значительно ниже  $14^\circ\text{C}$ ). Но ведь температуры  $15$  и  $14^\circ\text{C}$  были указаны как температуры поверхностей оконного стекла, а опыт показывает, что между температурой окружающего воздуха и температурой поверхности окна обычно имеется значительная разница<sup>1)</sup>. Точнее говоря, слой воздуха с любой стороны окна выполняет роль теплоизолятора, и в обычных условиях перепад температур между внутренней и наружной частями дома приходится главным образом на этот слой воздуха. Поэтому в целях удержания тепла в доме значительно полезнее увеличить толщину воздушной прослойки (например, с помощью установки двойных оконных рам), чем просто наращивать толщину стекла.

Теплоизолирующие защитные свойства одежды также обусловлены действием воздушной прослойки. В отсутствие одежды наши тела нагревали бы воздух, соприкасающийся с кожей, и вскоре было бы достигнуто достаточно комфортное состояние, поскольку воздух — хороший теплоизолятор. Однако, поскольку воздух движется (до-

<sup>1)</sup> Если снаружи дует сильный ветер, то воздух перед окном будет постоянно заменяться новыми холодными порциями, так что градиент температуры между наружной и внутренней поверхностями стекла увеличится, а это приведет к возрастанию скорости тепловых потерь из дома.

статочно легкого дуновения ветерка или движения человека), теплые его слои сменяются холодными, в результате чего увеличиваются потери тепла телом человека. Одежда согревает нас потому, что она удерживает нагретый нами воздух и не дает ему легко уходить из нашего тела. Таким образом, строго говоря, от потери тепла нас предохраняет не одежда, а воздух, который удерживается одеждой. Пух и перо являются очень хорошим теплоизолятором, поскольку даже очень малое их количество во взбитом состоянии способно удержать значительный объем воздуха. С этой точки зрения можете ли вы объяснить, почему драпировки перед окном уменьшают утечку тепла из дома?

## 19.8. Передача теплоты; конвекция

Несмотря на то что жидкости и газы являются, как правило, не очень хорошими проводниками тепла, они могут обеспечивать довольно быструю передачу его благодаря явлению конвекции. **Конвекция** – это процесс, благодаря которому теплота переносится за счет перемещения большого числа молекул из одного места в другое. Различие между явлениями теплопроводности и конвекции в том, что в первом из них молекулы перемещаются лишь на очень малые расстояния (порядка длины свободного пробега) и затем сталкиваются, в то время как во втором случае молекулы перемещаются на значительные расстояния.

Конвекция может быть как *вынужденной*, так и *естественной*; примером конвекции первого типа может служить нагреватель с вентилятором, с помощью которого нагретый воздух вдувается в комнату. Известным примером естественной конвекции является подъем вверх нагретого воздуха. Например, вблизи радиатора отопления (или другого нагревателя) воздух по мере нагревания расширяется и, следовательно, его плотность по сравнению с другими слоями уменьшается, что и приводит к его подъему. Крупномасштабное проявление естественной конвекции можно наблюдать на примере теплых или холодных океанских течений (например, Гольфстрима).

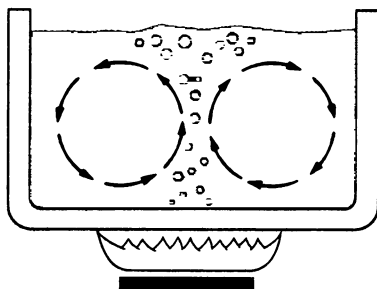


Рис. 19.5. Конвекционные потоки в котелке воды, нагреваемом на газовой горелке.

Ветер представляет собой еще один пример явления конвекции; вообще погодные условия обусловлены в конечном счете конвективными движениями (токов) воздуха.

При нагревании сосуда с водой (рис. 19.5) токи конвекции возникают по мере того, как нагретая вода из нижней части сосуда поднимается вверх благодаря уменьшившейся плотности и замещается более холодной водой из верхней части сосуда. Этот принцип лежит в основе действия многих отопительных систем в домах и других сооружениях. Мы не будем заниматься количественным изучением конвекции, поскольку этот вопрос достаточно сложен и, по существу, больше относится к инженерным задачам, чем к физическим.

## 19.9. Передача теплоты; излучение

Для того чтобы передать теплоту как посредством конвекции, так и за счет теплопроводности, необходимо наличие вещества. Однако, например, жизнь на Земле целиком и полностью зависит от солнечной энергии, которая переносится от Солнца к Земле сквозь пустое (точнее, почти пустое), т.е. не заполненное веществом, пространство. Такая форма передачи энергии может быть осуществлена лишь за счет теплообмена и называется излучением. Напомним, что температура Солнца (6000 К) значительно превышает температуру поверхности Земли. Тепло, которое мы воспринимаем от горячего огня, также передается главным образом посредством излучения; например, большая часть воздуха, нагреваемого в печи, поднимается вверх за счет конвекции и уходит в трубу, не достигая нас.

В последующих главах мы увидим, что излучение состоит, по существу, из электромагнитных волн. Здесь достаточно лишь заметить, что солнечное излучение содержит как видимый свет, так и много других длин волн, к которым глаз человека не чувствителен, в том числе инфракрасное (ИК) излучение, в основном и нагревающее Землю.

Как показали эксперименты (и подтвердила теория), энергия, излучаемая нагретым телом в единицу времени, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры  $T$ . Это означает, что если для сравнения взять два тела с температурами соответственно 2000 и 1000 К, то первое излучает энергию в  $2^4 = 16$  раз больше, чем второе. Величина излучаемой энергии пропорциональна также площади поверхности  $A$  излучающего тела, так что энергия, излучаемая в единицу времени, запишется в виде

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4, \quad (19.3)$$



где  $\sigma$  – универсальная постоянная, называемая *постоянной Стефана–Больцмана*, значение которой равно

$$\sigma = (5,67032 \pm 0,00071) \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4,$$

или округленно

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4.$$

Безразмерное число  $e$ , величина которого находится в пределах от 0 до 1, называется *излучательной способностью* и характеризует свойство самого вещества. Очень черные поверхности (например, древесный уголь) имеют значение  $e$ , близкое к единице, в то время как у блестящих поверхностей величина  $e$  близка к нулю, и поэтому они излучают меньше энергии. Вообще говоря, значение  $e$  слегка зависит от температуры тела.

Любое тело не только излучает энергию, но также и поглощает энергию, излученную другими телами. Если излучательная способность тела равна  $e$ , а площадь его поверхности  $A$ , причем поверхность тела находится при температуре  $T_1$ , то тело излучает в единицу времени энергию  $e\sigma AT_1^4$ . В случае когда тело окружено средой, находящейся при температуре  $T_2$  и излучающей в единицу времени энергию, пропорциональную  $T_2^4$ , энергия, поглощаемая телом в единицу времени, также будет пропорциональна  $T_2^4$ . Таким образом, *резльтирующий* тепловой поток, излучаемый телом, запишется в виде

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma A(T_1^4 - T_2^4), \quad (19.4)$$

где  $A$  – площадь поверхности тела,  $T_1$  – его температура,  $e$  – его излучательная способность (при температуре  $T_1$ ) и  $T_2$  – температура окружающей среды. Следует заметить, что в выражении (19.4) поглощение телом энергии в единицу времени принято равным  $e\sigma AT_2^4$ , т.е. коэффициент пропорциональности перед  $T^4$  один и тот же как для излучения, так и для поглощения. Этот факт согласуется с экспериментальным наблюдением, состоящим в том, что тепловое равновесие между телом и окружающей его средой достигается, когда температуры у них становятся одинаковыми; иными словами, величина  $\Delta Q/\Delta t$  должна обращаться в нуль при  $T_1 = T_2$ , так что коэффициент при каждом слагаемом должен быть одним и тем же. Таким образом, тело, которое хорошо излучает, столь же хорошо и поглощает излучение. Черные или очень темные, хорошо излучающие тела поглощают почти полностью все падающее на них излучение; именно поэтому окрашенная в светлые тона одежда в жаркий день предпочтительнее, чем одежда темных расцветок. С другой стороны, блестящие поверхности не только мало излучают, но столь же мало и поглощают падающее на них излучение (большая часть этого излучения отражается).

Поскольку как само тело, так и его окружение излучают энергию, всегда существует результирующий перенос энергии в том или ином направлении; он отсутствует лишь в случае, когда температуры тела и окружения одинаковы. Как видно из соотношения (19.4), при  $T_1 > T_2$  результирующий поток теплоты направлен от тела к окружению, так что тело при этом охлаждается; если же  $T_1 < T_2$ , то результирующий поток теплоты направлен от окружения к телу, так что тело нагревается и температура его повышается. Если различные части окружающей среды находятся при разных температурах, то соотношение (19.4) принимает более сложный вид.

**Пример 19.7.** Две чайные кружки – керамическая с  $e = 0,70$  и блестящая с  $e = 0,10$  – содержат по 0,75 л чая при температуре  $95^\circ\text{C}$ . а) Оцените тепловые потери каждой чашки в единицу времени. б) Найдите, насколько упадет температура чая в каждой чашке через 30 мин. Учитывайте только потери, обусловленные излучением, и примите температуру окружения равной  $20^\circ\text{C}$ .

**Решение.** а) Чайную кружку на 0,75 л чая можно приближенно представить в виде куба с ребром 10 см, так что площадь ее поверхности нетрудно вычислить, и она будет равна примерно  $5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ . Потери теплоты в единицу времени будут равны приближенно

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{\Delta t} &= e\sigma A(T_1^4 - T_2^4) = \\ &= e(5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4)(5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2) \times \\ &\times ([368 \text{ К}]^4 - [293 \text{ К}]^4) = \\ &= e(30) \text{ Дж/с}, \end{aligned}$$

или около 20 Вт для керамической кружки

( $e = 0,70$ ) и всего лишь около 3 Вт для блестящей ( $e = 0,10$ ).

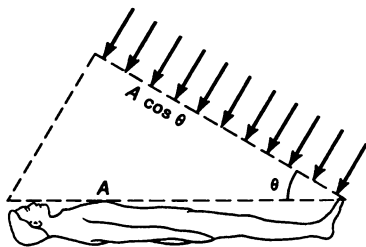
б) Для оценки перепада начальной и конечной температур в каждой чашке используем понятие удельной теплоемкости и пренебрежем вкладом самих кружек по сравнению с их содержимым (0,75 л чая). Используя выражение (19.1), имеем

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T}{\Delta t} &= \frac{(\Delta Q/\Delta t)}{mc} = \\ &= \frac{e(30) \text{ Дж/с}}{(0,75 \text{ кг})(4,18 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C})} = \\ &= e(0,01) ^\circ\text{C/с}, \end{aligned}$$

откуда находим, что через 30 мин (или 1800 с) температура керамической чашки упадет на  $12^\circ\text{C}$ , а блестящей – всего на  $2^\circ\text{C}$ . Блестящая чашка, очевидно, обладает преимуществом перед керамической (по крайней мере по отношению к излучению). Заметим, что в реальных условиях конвекция и теплопроводность могут играть большую роль, чем излучение.

Степень нагревания тела за счет солнечного излучения нельзя вычислить с помощью соотношения (19.4), поскольку в этом соотношении предполагается однородное распределение температуры  $T_2$  во всей окружающей тело среде, в то время как Солнце является, по существу, точечным источником; поэтому его следует рассматривать как дополнительный источник энергии. Нагревание за счет излучения Солнца вычисляется на основе того факта, что около 1350 Дж энергии каждую секунду падает на каждый квадратный метр атмосферы Земли (перпендикулярно солнечным лучам). Это число ( $1350 \text{ Вт/м}^2$ ) называется *солнечной постоянной*. Прежде чем энергия, излучаемая Солнцем, достигнет поверхности Земли, атмос-

Рис. 19.6. Лучистая энергия, падающая на тело человека под углом  $\theta$ .



фера может поглотить до 70% этой энергии (в зависимости от состояния облачности). В ясный день на земную поверхность падает около  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ; это означает, что тела с излучательной способностью  $\epsilon$  и площадью  $A$  поверхности, обращенной к Солнцу, поглощают в единицу времени количество теплоты (в ваттах) около  $1000\epsilon A \cos \theta$ , где  $\theta$  – угол между направлением солнечных лучей и нормалью к поверхности  $A$  (рис. 19.6). Иными словами,  $A \cos \theta$  – площадь «эффективной» поверхности, перпендикулярной солнечным лучам. Множитель  $\cos \theta$  лежит в основе объяснений ряда явлений, таких, как характер времен года, существование нетающих полярных льдов и айсбергов, а также большой нагрев земной поверхности в полдень по сравнению с временем захода и восхода Солнца (разумеется, в этих случаях играет роль также продолжительность светового дня).

## Заключение

*Тепловая, или внутренняя, энергия  $U$*  является, как правило, полной энергией всех молекул тела<sup>1)</sup>. Под *теплотой* понимается способ передачи энергии от одного тела к другому (теплообмен), не сопровождающийся совершением работы, а целиком обусловленный разностью температур. Количество переданной таким способом энергии (количество теплоты) измеряется в единицах энергии (например, в джоулях); иногда для количества теплоты или тепловой энергии применяют внесистемные единицы – калории или килокалории (1 кал = 4,186 Дж представляет собой количество теплоты, необходимое для повышения температуры 1 г воды на 1 °С).

*Удельная теплоемкость* вещества  $c$  определяется как количество энергии (переданное в форме теплоты), необходимое для изменения температуры единицы массы данного вещества на 1 кельвин. Величина  $c$  входит в выражение  $Q = mc\Delta T$ , где  $Q$  – количество теплоты, сообщенной телу или отобранной у него,  $\Delta T$  – изменение температуры, а  $m$  – масса вещества. Если теплота переходит между частями изолированной (адиабатически) системы, то количество теплоты, получаемое одной частью системы, в

<sup>1)</sup> Здесь, разумеется, следует исключить энергию поступательного движения как целого. – *Прим. ред.*

точности равно (по абсолютной величине) количеству теплоты, теряемому другой ее частью. На этом основан раздел физического эксперимента, называемый *калориметрией* и состоящий в количественном измерении процессов теплообмена.

Обмен энергией (без изменения температуры) происходит всегда при переходе вещества из одной фазы в другую, и дело здесь заключается в изменении потенциальной энергии взаимодействия молекул в результате изменения их относительных положений. *Теплота плавления* – это количество теплоты, необходимое для того, чтобы расплавить 1 кг вещества, т.е. перевести его из твердой фазы в жидкую; она равна также количеству теплоты, которое отдает тело при обратном переходе – из жидкой фазы в твердую. *Теплота парообразования* – это количество энергии (теплоты), необходимое для того, чтобы перевести 1 кг вещества из жидкого состояния в парообразное; это же количество энергии выделяется, когда вещество конденсируется из парообразной фазы в жидкую.

Теплота переносится из одного места (или от одного тела) в другое (к другому телу) тремя различными способами. В процессе *теплопроводности* энергия от молекул с более высокой кинетической энергией в результате столкновений переходит к соседним молекулам с низшей кинетической энергией. *Конвекция* – это способ передачи энергии путем перемещения большого числа молекул на значительные расстояния. Наконец, *излучение* вообще не требует наличия вещества; в ходе этого процесса энергия передается посредством электромагнитных волн (например, от Солнца к Земле). Все тела излучают энергию; ее величина пропорциональна площади поверхности тела и четвертой степени его абсолютной температуры. Излучаемая телом (поглощаемая) энергия зависит также от того, какой является поверхность тела – темной (поглощающей) или, напротив, блестящей (ярко отражающей); это свойство поверхности характеризуется излучательной способностью.

## Вопросы

1. Во что переходит совершаемая человеком работа, когда он интенсивно взбалтывает банку с апельсиновым соком?
2. Участвует ли действительно в опыте Джоуля (рис. 19.1) теплота?
3. Если горячее тело нагревает холодное, существует ли между ними поток температуры? Одинаковы ли изменения температуры обоих тел?
4. Объясните, почему высшая и низшая годовые температуры в точках на берегу океана

принимают меньшие значения, чем в точках в глубине материка, расположенных на той же широте.

5. Существуют области с теплым климатом, где могут произрастать теплолюбивые тропические растения, однако температура в этих областях несколько раз за зиму может опускаться ниже точки замерзания воды. Объясните, почему с целью хотя бы частично предохранить чувствительные растения от вымерзания их следует поливать вечером.
6. Удельная теплоемкость воды весьма велика. Объясните, почему благодаря этому факту во-

да является наиболее удачным рабочим телом для отопительных систем (прежде всего для радиаторов водяного отопления).

7. Почему вода во фляге дольше остается холодной, если матерчатый футляр фляги подерживается влажным?

8. Объясните, почему горячий пар причиняет столь тяжелые ожоги коже человека.

9. Используя понятия скрытой теплоты, или теплоты фазового перехода, и внутренней энергии, объясните, почему вода при испарении охлаждается (т. е. ее температура понижается).

10. Почему при использовании для обогрева жилища калорифера с горячим воздухом необходимо обеспечить возврат охлажденного воздуха обратно в калорифер через специальный вентиль? Что произойдет, если этот вентиль окажется перекрытым (например, книжной полкой)?

11. Рано утром, после того как Солнце достигло склона горы, заметна тенденция к небольшому подъему воздуха вверх. Позднее, когда склон попадает в область тени, наблюдается обратная тенденция. Объясните.

12. Сварится ли картошка быстрее, если вода будет кипеть более интенсивно (т. е. подвод тепла увеличится)?

13. Охлаждает ли воздух обычный электрический вентилятор? Объясните. Если ответ отрицательный, то в чем смысл применения этого устройства?

14. Температура в верхних слоях земной атмосферы может достигать  $700^{\circ}\text{C}$ . Однако любое живое существо в этих слоях замерзнет и погибнет, вместо того чтобы свариться. Объясните.

15. Для чего внутреннюю поверхность колбы термоса делают посеребренной, а между внутренней и внешней стенками создают вакуум?

16. Объясните, почему температура воздуха определяется по показаниям термометра, находящегося в тени.

17. Если дом стоит на фундаменте, под которым может находиться воздух, то пол в нем обычно холоднее, чем в доме, покоящемся непосредственно на твердом основании (например, на сплошном бетонном фундаменте). Объясните.

18. Ночью поверхность Земли охлаждается значительно быстрее, если погода не облачная, а ясная. Объясните это явление.

19. Легкие морские бризы часто наблюдаются в солнечные дни на берегах больших водоемов. Объясните это явление с учетом того факта, что температура суши растет быстрее, чем температура прилегающей к ней воды.

20. Качество спальных мешков и парок (одежды эскимосов) часто характеризуется фактиче-

ской толщиной (в дюймах или сантиметрах) этих одеяний, когда они максимально взбиты (или «впущены»). Объясните.

21. Почему одежда светлых тонов в жарком климате предпочтительнее, чем темная?

22. Недоношенный ребенок, находясь в кювезе с достаточно теплым воздухом, может тем не менее опасно переохладиться. Объясните.

23. Количество теплоты, необходимое для нагревания комнаты в Северном полушарии, значительно больше в том случае, когда окна комнаты выходят на север, а не на юг. Объясните.

24. Предположим, что вам предложили спроектировать одно из следующих помещений (выберите любое: жилой дом, концертный зал, больницу). Перечислите все источники тепла для выбранного помещения, которые вы можете представить себе; оцените количество теплоты, выделяемое каждым из них.

25. Тепловые потери через окна обусловлены следующими процессами: 1) вентиляцией вблизи негерметичных краев, 2) утечкой через раму (особенно, если она из металла), 3) утечкой через поверхность стекла и 4) излучением. а) Каков механизм утечки в первых трех случаях: теплопроводность, конвекция или излучение? б) Какие из механизмов утечки будут ослаблены, если завесить окна тяжелыми шторами? Объясните подробно.

26. Кусок дерева, лежащий на солнце, поглощает больше тепла, чем кусок блестящего металла тех же размеров. Однако дерево наощупь кажется менее теплым, чем металл. Объясните.

## Задачи

### Раздел 19.2

1. (I) Какую работу должен совершить человек, чтобы компенсировать съеденный кусок пирога калорийностью 400 ккал?

2. (I) Британская тепловая единица (Btu) является единицей количества теплоты в Британской системе единиц; она определяется как количество теплоты, требуемое для повышения температуры 1 фунта воды на  $1^{\circ}\text{F}$ . Покажите, что

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ кал} = 1055 \text{ Дж.}$$

3. (I) Водяной нагреватель может производить 7500 кал/ч. Сколько воды сможет он нагреть в течение часа от  $20$  до  $60^{\circ}\text{C}$ ?

4. (II) Какое количество теплоты (в килокалориях) создается, когда тормоза автомобиля массой 1200 кг замедляют его скорость от 90 км/ч до нуля?

## Раздел 19.5

5. (I) Чему равна удельная теплоемкость металлического вещества, если для нагревания 4,5 кг этого вещества от 20 до 42 °С требуется 36 ккал?

6. (I) Каков водяной эквивалент (с точки зрения количества теплоты при нагревании) для 0,228 кг стекла?

7. (I) Чему равна удельная теплоемкость воды в британских единицах  $\text{Btu}/\text{фунт} \cdot ^\circ\text{F}$  (см. задачу 2)?

8. (I) Теплоемкость  $C$  тела определяется как количество теплоты, необходимое для повышения его температуры на 1 °С. Таким образом, для повышения температуры тела на  $\Delta T$  необходимо количество теплоты, равное

$$Q = C \Delta T.$$

а) Выразите теплоемкость  $C$  через удельную теплоемкость  $c$  вещества. б) Чему равна теплоемкость (при постоянном давлении) 1 кг воды? в) Тот же вопрос относительно 35 кг воды.

9. (II) Определите калорийность (в ккал) куска пирога массой 100 г определенного сорта выпечки по следующим измерениям. Кусочек пирога массой 10 г подвергают высушиванию, а затем помещают в герметичный сосуд высокого давления, называемый *калориметрической бомбой*, содержащей газообразный кислород  $\text{O}_2$ . Затем алюминиевая «бомба» массой 0,615 кг помещается в воду массой 2,00 кг, которая находится в алюминиевой чашке калориметра массой 0,524 кг. После этого кусочек пирога сжигают в атмосфере кислорода  $\text{O}_2$ , в результате чего температура всей установки поднимается с 12 до 31 °С. (Теплоемкостью газов пренебрегите.)

10. (II) а) Покажите, что если удельная теплоемкость зависит от температуры  $T$ , т.е. мы имеем функцию  $c(T)$ , то количество теплоты, необходимое для повышения температуры вещества от  $T_1$  до  $T_2$ , дается выражением

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc(T)dT.$$

б) Пусть для некоторого вещества  $c(T) = c_0(1 + aT)$ , где  $a = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $T$  — температура по шкале Цельсия. Определите, какое количество теплоты необходимо для повышения температуры от  $T_1$  до  $T_2$ . в) Чему равно среднее значение  $c$  на интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$  (см. п. «б»), выраженное через значение удельной теплоемкости  $c_0$  при температуре 0 °С.

11. (II) Стекланный термометр массой 45 г показывает 19,0 °С, а затем его помещают в 220 мл воды. После того как вода и термометр

приходят в тепловое равновесие, показание термометра оказывается равным 38,5 °С. Чему была равна начальная температура воды?

12. (II) Молоток массой 0,50 кг имел скорость 5,0 м/с непосредственно перед ударом по гвоздю, после которого он остановился. Оцените повышение температуры железного гвоздя массой 15 г после десяти таких ударов молотка, быстро следующих один за другим. Считайте, что гвоздь полностью поглощает всю выделившуюся теплоту.

13. (II) Чему будет равна температура в состоянии теплового равновесия, после того как кусок меди массой 200 г при температуре 210 °С помещается в алюминиевую чашку калориметра массой 180 г, содержащую 800 г воды при температуре 11,0 °С?

14. (II) Кусок железа массой 290 г при температуре 190 °С помещается в алюминиевую чашку калориметра массой 100 г, содержащую 250 г глицерина при температуре 10 °С; измерена конечная температура 38 °С. Чему равна удельная теплоемкость глицерина?

15. (II) В результате физической работы средней интенсивности человек массой 70 кг производит 200 ккал/ч. Считая, что 20% этой теплоты переходит в полезную работу, а остальные 80% — в теплоту, вычислите, насколько повысится температура тела человека спустя 1,00 ч, если несколько этой теплоты не передается окружению.

16. (II) Сколько времени потребуется для того, чтобы в электрическом кофейнике мощностью 500 Вт довести до кипения воду объемом 0,45 л с начальной температурой 10 °С? Считайте, что нагреваемая часть кофейника, содержащая воду, изготовлена из 400 г алюминия.

17. (II) 220 г некоторого вещества нагреваются до температуры 330 °С и затем помещаются в алюминиевую чашку калориметра массой 90 г, содержащую 150 г воды при температуре 11,5 °С. Конечная температура, измеренная стеклянным термометром массой 17 г, оказалась равной 33,8 °С. Какова удельная теплоемкость этого вещества?

18. (II) Свинцовый стержень диаметром 1,50 см поглощает 82 ккал теплоты. На сколько увеличится его длина? Что произошло бы в том случае, если бы длина стержня была равна лишь 2,0 см?

## Раздел 19.6

19. (I) Во время физических упражнений человек может выделить 180 ккал теплоты в течение 30 мин за счет испарения пота с кожных покровов. Какое количество воды теряет при этом человек?

20. (I) Какое количество теплоты необходимо для того, чтобы расплавить 13,00 кг серебра, первоначально находившегося при температуре  $20^\circ\text{C}$ ?

21. (I) Если сообщить  $1,70 \cdot 10^5$  Дж энергии сосуду с кислородом, находящимся при температуре  $-183^\circ\text{C}$ , то какое количество кислорода испарится?

22. (II) Железный котел массой 128 кг содержит 780 кг воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Нагреватель сообщает энергию со скоростью 16000 ккал/ч. Сколько времени потребуется для того, чтобы а) достичь точки кипения воды; б) превратить всю воду в пар?

23. (II) Удельная теплоемкость ртути равна  $0,033$  ккал/кг $\cdot^\circ\text{C}$ . Определите теплоту плавления ртути, используя данные калориметрии: 1,00 кг твердой ртути Hg в точке плавления при  $-39,0^\circ\text{C}$  помещается в алюминиевый калориметр массой 0,620 кг, содержащий 0,400 кг воды при температуре  $12,80^\circ\text{C}$ , причем равновесная температура равна  $5,06^\circ\text{C}$ .

24. (II) Каков будет конечный результат опыта, в котором смешиваются равные количества льда при  $0^\circ\text{C}$  и пара при  $100^\circ\text{C}$ ?

25. (II) Конькобежец массой 55,0 кг, движущийся со скоростью 8,5 м/с, скользит по льду и останавливается. Если лед находится при температуре  $0^\circ\text{C}$  и 50% теплоты, произведенной в результате трения, поглощается льдом, то какое количество льда растает?

26. (II) Свинцовая пуля массой 25 г, летящая со скоростью 400 м/с, проходит сквозь тонкую железную преграду, после которой скорость пули уменьшается до 250 м/с. Если пуля поглощает 50% произведенной теплоты, то а) на сколько повысится температура пули? б) Если начальная температура пули была равна  $20^\circ\text{C}$ , то расплавится ли пуля целиком (или, возможно, какая-либо ее часть)?

#### Разделы 19.7–19.9

27. (I) а) Какая мощность излучается вольфрамовым шаром (излучательная способность  $e = 0,35$ ) радиусом 10 см, находящимся при температуре  $20^\circ\text{C}$ ? б) Если шар находится в объеме, стенки которого поддерживаются при температуре  $-5^\circ\text{C}$ , то чему будет равен *результатирующий* тепловой поток из шара?

28. (I) На какое расстояние должен перемещаться тепловой поток от подкожных капилляров к поверхности тела за счет теплопроводности, если разность температур составляет  $0,50^\circ\text{C}$ ? Считайте, что через всю поверхность тела площадью  $1,5\text{ м}^2$  должно выделяться 200 ккал/ч.

29. (I) Оцените приближенное значение энергии излучения, которую человек с площадью поверхности тела  $1,5\text{ м}^2$  поглощает в течение часа от Солнца, если солнечные лучи падают на него в ясный день под углом  $40^\circ$  к вертикали. Считайте, что  $e = 0,80$ .

30. (II) Оцените скорость, с которой теплота из внутренней части тела человека может передаваться к его поверхности. Считайте, что толщина ткани равна 4,0 см, температура кожи  $34^\circ\text{C}$ , а внутренних органов  $37^\circ\text{C}$ ; площадь поверхности кожи равна  $1,5\text{ м}^2$ . Сравните полученный результат со значением 200 ккал/ч, которое должен выделять человек, производящий нетяжелую работу. Отсюда становится ясным, почему необходимо конвективное охлаждение кожи за счет циркуляции крови по капиллярам.

31. (II) Электрическая лампочка мощностью 100 Вт производит 95 Вт теплоты, которая рассеивается через стеклянный баллон лампы радиусом 3,0 см и толщиной 1,00 мм. Чему равна разность температур между внутренней и внешней поверхностями стеклянного баллона лампы?

32. (II) Альпинист носит теплую одежду толщиной 2,8 см с общей поверхностью  $1,8\text{ м}^2$ . Температура на внешней поверхности одежды равна  $0^\circ\text{C}$ , а на внутренней (соприкасающейся с кожей)  $34^\circ\text{C}$ . Определите мощность теплового потока за счет теплопроводности через одежду альпиниста, если а) одежда сухая, а ее коэффициент теплопроводности  $k$  соответствует пуху; б) одежда мокрая и коэффициент теплопроводности  $k$  соответствует воде (учтите, что при этом одежда уплотнилась до толщины 0,5 см).

33. (II) Запишите выражение для полного теплового потока (в единицу времени) сквозь стены дома, если стена общей площадью  $A_1$  и толщиной  $l_1$  изготовлена из материала с коэффициентом теплопроводности  $k_1$ , а окна площадью  $A_2$  и толщиной  $l_2$  имеют коэффициент теплопроводности  $k_2$ . Разность температур равна  $\Delta T$ .

34. (II) Закон Ньютона для охлаждения гласит, что при малых разностях температур тело охлаждается со скоростью

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k(T_1 - T_2),$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры соответственно тела и окружения, а  $b$  – постоянный коэффициент. Этот закон учитывает процессы теплопроводности, конвекции и излучения. Подобное линейное соотношение вполне очевидно, если ограничиться только процессом теплопроводности. Покажите, что это соотношение приближенно справедливо также и для излучения, т. е.

покажите, что формула (19.4) сводится к выражению

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = 4\sigma eAT_2^3(T_1 - T_2) = \text{const} \cdot (T_1 - T_2),$$

если разность  $T_1 - T_2$  мала.

35. (II) Коэффициент  $U$ , определяемый соотношением

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = AU(T_2 - T_1),$$

часто используется при практических расчетах. Заметим, что  $U$  равно тепловому потоку в единицу времени на единицу площади поперечного сечения в расчете на  $1^\circ\text{C}$ . а) Как связан коэффициент  $U$  с коэффициентом теплопроводности  $k$ ? б) Является ли коэффициент  $U$  характеристическим параметром вещества? Если нет, то что еще следует знать, чтобы определить коэффициент  $U$ ? в) Запишите уравнение, описывающее полные тепловые потоки за счет теплопроводности из комнаты данного объема, через значения  $U$  для различных материалов. считайте, что окна имеют общую площадь  $A_1$  и характеризуются коэффициентом  $U_1$ . Стены имеют полную площадь  $A_2$  и состоят из трех слоев: кирпича ( $U_2$ ), воздушной прослойки ( $U_3$ ) и дерева ( $U_4$ ). г) Чему равен коэффициент  $U$  для кирпичной стены толщиной 12 см, шириной 8,0 м и высотой 2,5 м?

36. (II) В доме имеются хорошо теплоизолированные стены толщиной 22,0 см (предположите, что их теплопроводность равна теплопроводности воздуха) и площадью  $350\text{ м}^2$ , деревянная крыша толщиной 5,5 см и площадью  $280\text{ м}^2$  и окна без ставней толщиной 0,65 см с общей площадью  $28\text{ м}^2$ . а) Вычислите скорость, с которой тепло должно сообщаться дому для поддержания в нем температуры  $20^\circ\text{C}$ , если температура вне дома  $-5^\circ\text{C}$  и потери тепла происходят только из-за теплопроводности. б) Если в начальный момент времени температура в доме была  $10^\circ\text{C}$ , то какое приблизительно количество теплоты необходимо сообщить, чтобы поднять температуру в доме до  $20^\circ\text{C}$  за 30 мин? считайте, что в подогреве нуждается только воздух внутри дома, объем которого равен  $700\text{ м}^3$ . в) Если 1 кг природного газа стоит 0,055 долл., а теплота, выделяющаяся при его сгорании, равна  $10^7\text{ Дж/кг}$ , то сколько придется платить за газ в месяц, чтобы поддерживать дом в состоянии, описанном в п. «а», в течение 12 ч каждые сутки? считайте, что на обогрев дома идет 90% теплоты, выделившейся при сгорании газа. Теплоемкость воздуха считайте равной  $0,17\text{ ккал/кг}\cdot^\circ\text{C}$ .

37. (II) Окно с двойным остеклением состоит из рамы, в которую вставлены два стекла, разделенные воздушной прослойкой. а) Покажите, что скорость теплового потока благодаря теплопроводности дается следующей формулой:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{A(T_2 - T_1)}{l_1/k_1 + l_2/k_2 + l_3/k_3},$$

где  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  – теплопроводность соответственно стекла, воздуха и стекла. б) Обобщите эту формулу на случай произвольного количества слоев различных материалов, расположенных друг за другом.

38. (II) Оцените, за какое время растают 20 кг льда при  $0^\circ\text{C}$ , помещенные в тщательно закрытый теплоизолированный ящик из пенопласта размером  $30\text{ см} \times 20\text{ см} \times 50\text{ см}$  со стенками толщиной 1,5 см. считайте, что теплопроводность у пенопласта такая же, как и у воздуха, а температура вне ящика равна  $25^\circ\text{C}$ .

39. (II) Лист площадью  $40\text{ см}^2$  и массой  $4,5 \cdot 10^{-4}\text{ кг}$  в ясный день повернут к Солнцу. Излучательная способность листа равна 0,85, а удельная теплоемкость  $0,80\text{ ккал/кг}\cdot\text{K}$ . а) С какой скоростью повышается температура листа? б) Вычислите температуру листа, если все потери теплоты обусловлены излучением (температура окружающей среды равна  $20^\circ\text{C}$ ). в) Какими иными способами лист может рассеивать теплоту?

40. (II) Домашняя установка для поддержания постоянной температуры установлена на температуру  $22^\circ\text{C}$ . Ночью она отключается, и на 8 ч температура устанавливается равной  $12^\circ\text{C}$ . Какое потребуется количество дополнительной теплоты (в процентах от ежедневной потребности теплоты), если установку не отключать на ночь? считайте, что средняя температура вне дома равна  $0^\circ\text{C}$  в течение 8 ч ночью и  $8^\circ\text{C}$  остальную часть суток, а также, что теплоотдача дома пропорциональна разности температур вне дома и внутри него. Для получения требуемой оценки с помощью величин, заданных в условии, необходимо сделать дальней-

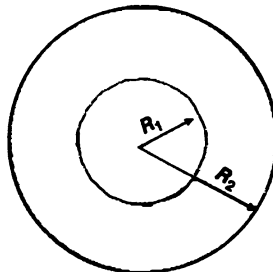


Рис. 19.7.



шие упрощающие предположения; укажите какие.

41. (III) Сфера радиусом  $R_2$  имеет сферическую концентрическую полость радиусом  $R_1$  (рис. 19.7). Полость заполнена веществом при температуре  $T_1$ , а внешняя поверхность сферы имеет температуру  $T_2$ . Покажите, что тепловой поток дается выражением

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{4\pi k (T_1 - T_2) R_1 R_2}{R_2 - R_1}.$$

42. (III) У цилиндрической трубки с внутренним радиусом  $R_1$  и внешним радиусом  $R_2$  внутренняя часть заполнена горячей водой с

температурой  $T_1$ . Температура снаружи трубки равна  $T_2$  ( $< T_1$ ). Покажите, что скорость теплоотдачи отрезка трубки длиной  $L$  равна

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{2\pi k (T_1 - T_2) L}{\ln(R_2/R_1)}.$$

б) Считайте, что трубка изготовлена из железа,  $R_1 = 1,50$  см,  $R_2 = 2,00$  см и  $T_2 = 30^\circ\text{C}$ . Если трубка заполнена водой с температурой  $T_1 = 98,00^\circ\text{C}$ , то на сколько понизится температура за секунду? в) Если в трубку поступает вода с температурой  $98,00^\circ\text{C}$  и течет по ней со скоростью  $4,0$  см/с, то чему будет равно падение температуры на один сантиметр пути?